

高炉の数学的モデルの研究を顧みて

著者	八木 順一郎
雑誌名	東北大学多元物質科学研究所素材工学研究彙報
巻	61
号	1/2
ページ	1-10
発行年	2006-03-01
URL	http://hdl.handle.net/10097/40551

高炉の数学的モデルの研究を顧みて

八木 順一郎*

My Research on Mathematical Modeling of Blast Furnace Process

By Jun-ichiro YAGI

移動現象工学に基づく高炉の数学的モデルの開発を中心に、高炉内要素現象の解明、高効率低環境負荷操業法の開発、開発されたモデルに基づく種々の高温充填層プロセスの解析、エネルギー効率の改善法、CO₂放出削減や高温排熱回収など環境改善に関する研究を行ってきた36年間の振り返り、その経緯と、得られた成果の概要をまとめた。

1. はじめに

日本の鉄鋼産業の興隆は、Fig. 1 に示した粗鋼生産量の変遷により概観することができる。この図より、1960-70年代の拡大期、70-80年代の効率追求期、90年代-現在の環境との調和期の3期間の存在が読み取れる。73年に起きたオイルショックは拡大を阻止し、また、92年に開かれた国連の環境会議は地球環境と人類社会の共存の時代を明確にしている。私が選鉱製鉄研究所において、製鉄プロセスの研究を始めた1969年はまさに日本の鉄鋼産業が急激な拡大期にあり、学術研究も、技術も欧米諸国に追いつくための努力がなされていたころであった。

大学院の学生時代には名古屋大学の鞭教授のもとで製鉄プロセスの数学的モデルの研究を行っていたが、当時のコンピューターは容量、演算速度ともに十分ではなく、1次元モデルの数値解を求めるに留まっていた。その後、炉内現象の解明、計算機の高速度化、大容量化に伴い、現在のような3次元非定常モデルによるシミュレーションが可能になった。

このような時代背景の中で、私の選研における初期の研究は鉄鉱石の還元の速度論的研究や高炉、シャフト炉による還元プロセスの解明であった。1983年に大森教授が特殊製鉄研究部門の担当に異動された後を受けて、冶金化学工学研究部門担当となり、製鉄プロセスの研究の一端を担うことになった。このころには、日本鉄鋼業の量的拡大は終わっており、産業界は生産プロセスの効率追求により、利益を増大させる時代であった。Table 1は、私が担当した期間に取り上げた主要な研究テーマと共同研究者を示している。当初は製鉄プロセスにおける伝熱、省エネルギー中心の研究からはじめ、次第に充填層反応器の他プロセスへの応用、廃棄物のリサイクル、排出エネルギーの有効利用、排出CO₂のメタノールやDMEへの転換など、環境改善を目指した課題に多く取り組むようになっていった。しかし、高炉の多次元モデルの研究は退職するまで、継続して実施してきた。これには、日本鉄鋼協会の研究会として、充填層中の気固液移動現象部会(1989~92)、4流体の移動現象研究会(1993~96)、高炉炉下部機能強化研究会(1997~2000)の3部会・研究会の部会長/主査を務めながら、十数年にわたり、産学協同研究を実施したこと、さらに、1999年から5年間に亘りコンパクト高炉プロジェクトに参加し共同研究¹⁾を行ってきたことが、長期に亘る研究を可能にしたといえる。Fig. 2は当研究室で実

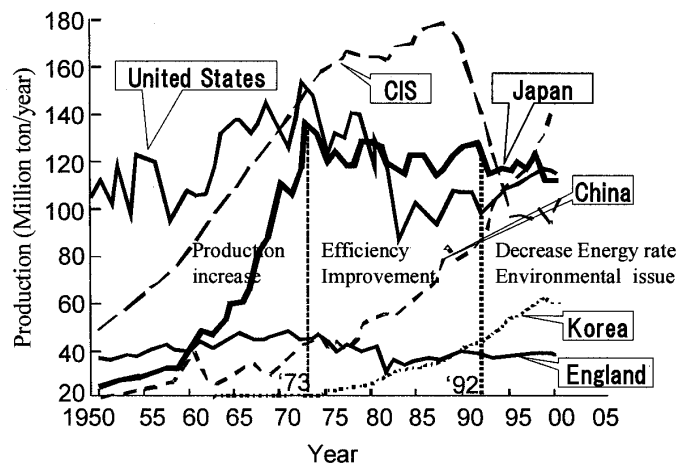


Fig. 1 Crude steel production in the world

* 東北大学名誉教授

Table 1. 主要研究テーマ (1969-1983-2005 年) .

年	研究テーマ	共同研究者
1969～	高炉モデルの研究 鉄鉱石の還元速度 融着充填層の研究	工藤純一, 武田幹治 高橋礼二郎 杉山喬
1983～	気・固間伝熱速度 コールドボンドペレット シャフト炉による還元 下水泥汚溶融炉 エクセルギー解析	秋山友宏 高橋礼二郎 沈峰満, 高橋礼二郎 王家兵, 高橋礼二郎 秋山友宏
1990～	Ilmeniteの還元 充填層における粉体の挙動 液流れ 高温蓄熱 高融点金属のプラズマ溶融	孫康, 高橋礼二郎 柴田耕一郎, 陳紀忠, 秋山友宏 牛明愷, 高橋礼二郎 秋山友宏 A. Fudolig, 埜上洋
1995～	メタノール合成 充填層型スクラップ溶解プロセス 水素吸蔵合金の燃焼合成 4流体モデルによる高炉モデル	村松淳司, 佐藤弘孝 張興和, 高橋礼二郎 秋山友宏, 李李泉 埜上洋, P. Austin, A. Castro, 儲満生, S. Pintowantoro
1997～	Lateriteの還元 スラグからの排熱回収 電気炉ダスト処理 (炭材フィルタ法) 充填層型廃棄物処理プロセス	H. Purwanto, 高橋礼二郎 葛西栄輝, 秋山友宏, 嶋田太平, V. Kochura 高橋礼二郎, 秋山友宏, M. Ribas, 孟繁明 埜上洋, 梁小平, 張興和
2000～	高炉炉芯の更新挙動 Nb-Al合金の燃焼合成 コークスの反応劣化と粉の発生 融着充填層の加熱・溶融	埜上洋, S. Pintowantoro 埜上洋 埜上洋 埜上洋

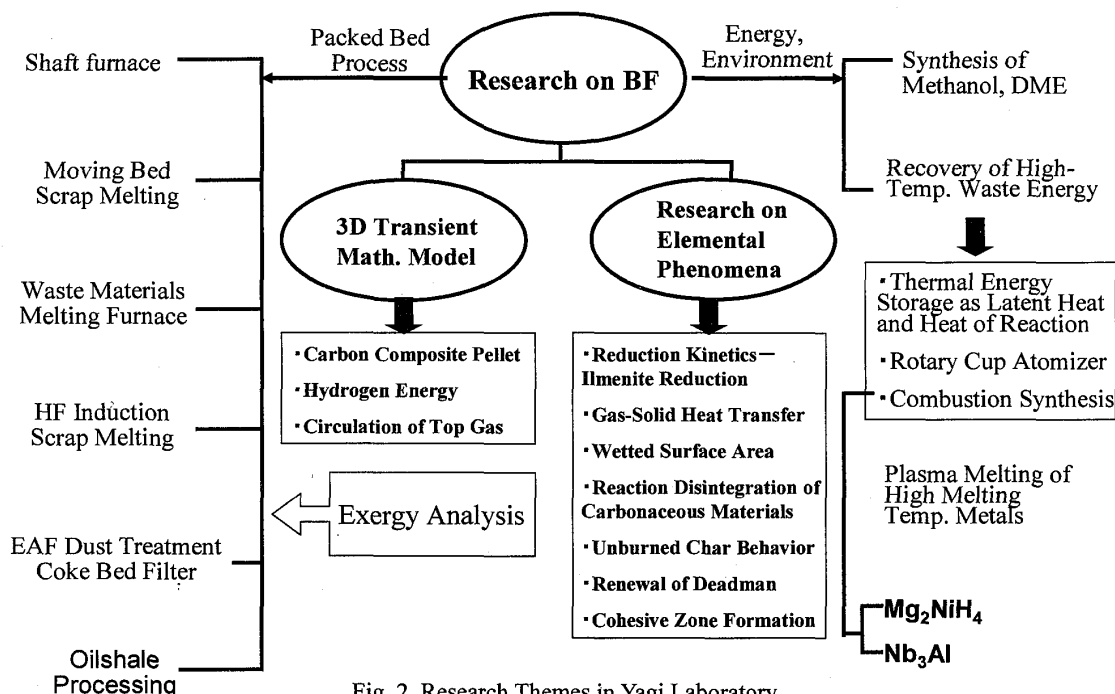


Fig. 2. Research Themes in Yagi Laboratory.

施した研究の相互関係をまとめて示している。高炉の数学的モデルの開発に関して行った要素現象の研究とシミュレーションモデルの研究から、その他の充填層プロセスの研究に発展し、また、モデルによるプロセス解析の結果から環境問題、特に、CO₂ 放出削減に関する研究テーマが取り上げられている。

2. 高炉の数学的モデル

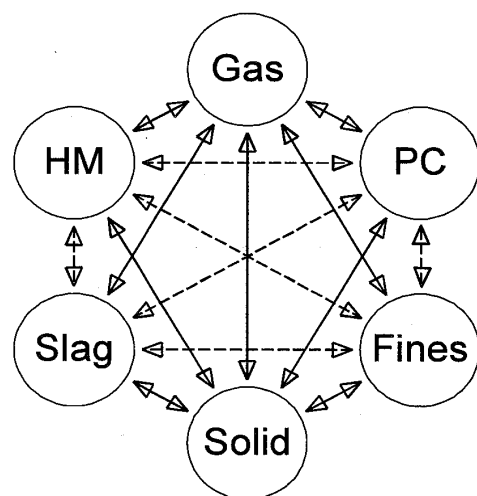
2.1 多流体理論に基づく高炉の数学的モデル

高炉の数学的モデルに関する研究は、当初は、実操業のシミュレーションに主眼が置かれていたが、最終的には、仮想操業のシミュレーションを可能にし、より効率的あるいは環境負荷の少ない操業技術の開発に利用できるレベルまで高めることができた。この数学的モデルは、運動量、エネルギー、質量の収支式から成りたっており、連続体を仮定し多流体理論に従うと、一般形で表し (1) 式のよ書くことができる。

$$\frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i \psi)}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_i \rho_i u_i \psi - \varepsilon_i \Gamma_\psi \text{grad} \psi) = S_\psi \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、下付き i は考慮した 6 つの相 (ガス、充填粒子、溶銑、スラグ、炭材粉体、鉄鉱石粉体) をあらわす。従属変数 ψ は解くべき変数であり、各相の流速、エンタルピー (温度)、質量分率である。 t は独立変数時間である。 ε は空隙率、 ρ は密度、 u は流速である。 Γ は粘性係数、熱伝導率、拡散係数などの輸送定数であり、温度や組成の関数である。 S は湧き出し項であり、相間における運動量、熱および物質の移動量および生成量を含んでいる²⁻⁴⁾。数値シミュレーションにおいては、高炉は複雑な形状をしているので、BFC 法 (Body Fitted Coordinate) が適用されている⁵⁾。

開発されたモデルには高炉内現象として、鉄鉱石の還元、コークスの燃焼やガス化のような気固反応のほか、ホットメタルや熔融スラグを介した固液あるいは気液反応、さらには気体間反応など多数の化学反応の速度が考慮されているが、これらに加えるに、固液相変態、気固液粉体 4 相間の伝熱、運動量移動、粒子の粉化、粉体の蓄積などが組み込まれている²⁻⁶⁾。Fig. 3 には取り扱っている異相間の相互作用が示されている。



\longleftrightarrow Mass, momentum & energy
 $\dashrightarrow \dashleftarrow$ Only mass

Fig. 3. Diagram of inter-phase momentum and heat transfer considered in the model.⁵⁾

2.2 高炉の超高効率・低環境負荷操業シミュレーション

高炉の超高生産、低還元材比、低環境負荷操業を実現するには Fig. 4 に示すように、低温化と高速還元化が重要であり、また、CO₂ 放出削減のためには、水素系の還元材使用⁹⁾や炉頂ガスの循環使用⁸⁾などが有望な方法として考えられる。これらの可能性が数学的モデルによるシミュレーションにより定量的に検討された。

還元的高速化のためには、焼結鉱の被還元性の改善、および、炭材内装ブリケット(CCB)の使用⁷⁾などが有効であり、また、低温化のためには、CCB の装入による熱保存帯温度の低下は有効であるが、これだけでは不十分であり、還元鉄の浸炭促進やスラグの低温溶融化が不可欠であ

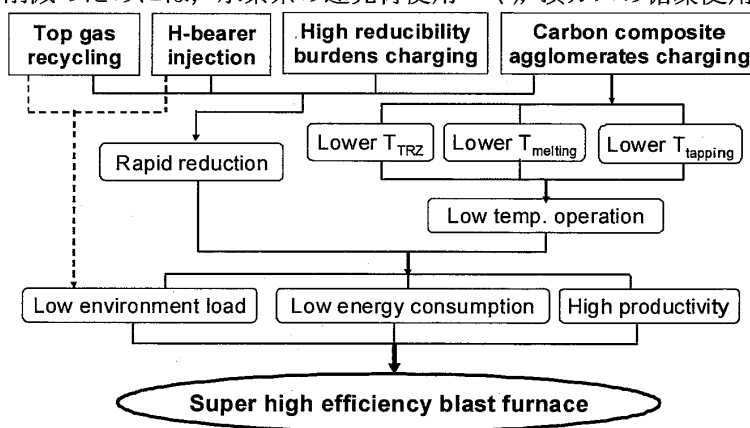


Fig. 4. Super high efficiency operation of blast furnace

る。低温溶融のメカニズムおよび速度はまだ十分には解明されていないが、数学的モデルを使用すると、低温化による高効率化の程度を予測することができる。

水素系還元材の使用については、環境負荷低減の観点も考慮して、プラスチックの吹込みが有望である。また、炉頂ガスのリサイクル使用は排出ガス削減のため有効であり、同時に高生産性を可能にできれば、将来展望が開ける方法であり期待されている。以下に、これら仮想操業についてのモデルによるシミュレーション結果を示す。

Fig. 5 は焼結鉱 100% 装入操業を基準操業(1)として、CCB を 20% 装入した場合(2)、その上に還元鉄の溶融温度を 100°C 低下させた場合(3)、さらにスラグ層表面における溶銑温度を 50°C 低下させた場合

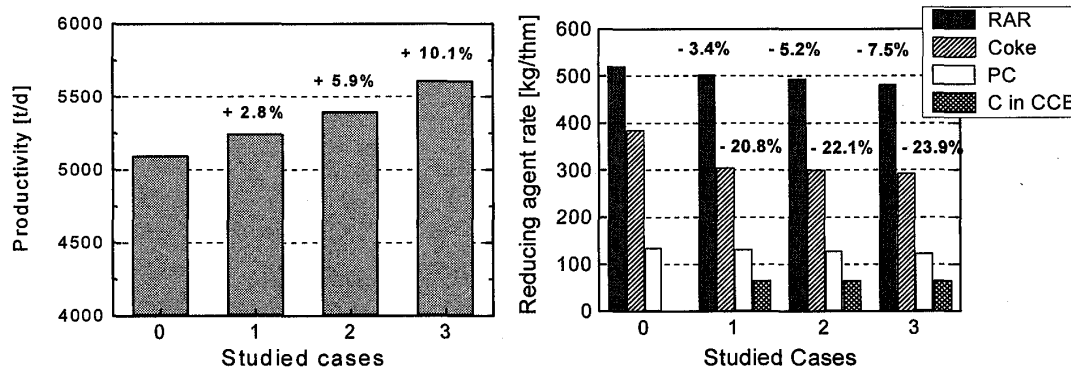


Fig. 5. Predicted productivity and reducing agent consumption under low temperature operation. ⁶⁾

(0: Base case, 1: Base case +20% CCB charge, 2: Case (1)+100°C Melting Temp. Decrease, 3: Case (2)+50°C Hot Metal Temp. Decrease)

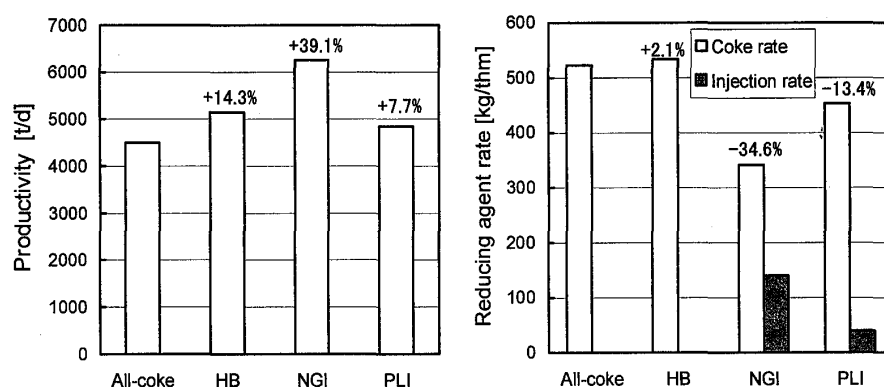


Fig. 6. Calculated Results of Production and Reducing Agent Rate for Humidified Blasting. ⁷⁾ (HB, 80g-H₂O/Nm³, Natural Gas Injection (NGI, 140kg/thm) and Plastic injection (PLI, 40kg/thm))

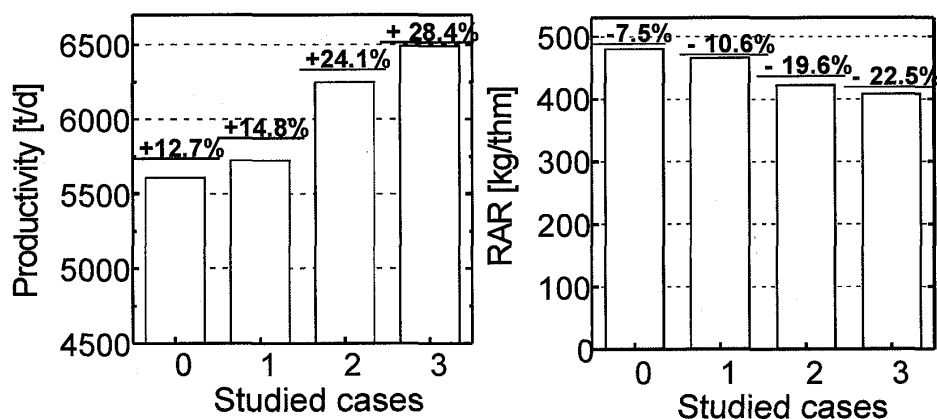


Fig. 7. Variations of major operation parameters with HRG recirculation⁸⁾. (Case 0: 20SB100-HM50; 1: SI20; 2: TI50; 3: SI20-TI50)

(4)の生産性と還元材比の変化を示している。約 10%の生産性の向上と 7.5%の還元材比の低下が期待できる。

Fig. 6 にはオールコークス操業を基準にして、水素含有補助還元材として、水蒸気、天然ガス、プラスチックを吹き込んだ場合の生産性、還元材比の改善効果を示している。このシミュレーションはレースウェイ温度、および、ボッシュガス流量一定の条件で行われているが、還元材の吹き込み量が異なるので、相互に直接比較することはできない。しかし、水蒸気吹き込みは生産性を改善するが、還元材比は悪化させる。天然ガスとプラスチックの吹き込みは生産性、還元材比のいずれにも改善効果があり、吹き込み量の違いを考慮すると、ほぼ、同程度の効果があることがわかる。

Fig. 7 に炉頂ガスのリサイクル操業に関する計算結果を示した。この場合、レースウェイ温度を維持するため酸素の富化が必要となる。また窒素の減少により、シャフト吹き込みが必要になる。基準操業（ケース 0）を 20%CCB 装入+熔融温度 100℃低下+溶銑温度 50℃低下とし、ケース 1 ではシャフトからの炉頂ガスの吹き込み量を羽口風量の 20%に、ケース 2 では羽口からの炉頂ガスリサイクル量を羽口風量の 50%に、ケース 3 ではその両者とし、レースウェイ温度とボッシュガス流量一定の条件のもとにシミュレーションを行った結果をしめしている。この計算では実炉操業に比べ生産量は 28.4%増加し、還元材比は 22.5%低下した。CO₂の排出量は 21.2%減少した。

多流体理論に基づくシミュレーションの結果は超高生産、超低エネルギー消費、超低環境負荷操業を開発することができる可能性を示しているが、さらに、浸炭現象の高速化、物性値の高精度推算法などの基礎的研究を進め、計算条件であるレースウェイ温度やボッシュガス量などの制限を取り払い、上述の操業パラメータを合理的に組み合わせた操業を実施すればさらに効率を改善することができると考えられる。

3. 高炉モデルの応用

高炉は複雑な充填層プロセスであり、その数学的モデルは他の充填層プロセスの解明に活用できる。当研究室では省エネルギー、CO₂放出削減などをめざし、1) シャフト炉、2) 高周波誘導加熱キュボラ、3) スクラップ溶解移動層、4) 廃棄物処理用ガス化熔融炉、5) 電気炉ダストから直接 Zn および Fe を回収するプロセスの炭材フィルター、6) オイルシェールからオイルを回収する充填層プロセスなどの解析に応用した。

代表的な成果として、Fig. 8 には工場で発生した再酸化鉄粉と粉炭から製造したブリケットを加熱したときの反応による質量の変化を示している⁹⁾。この結果に基づき反応速度を求めることができ、別途測定した浸炭速度とともに数学的モデルに組み込み、移動層内における還元、浸炭、熔融状況を予測し、必要エネルギー量を推定可能にした。また、炭材フィルターにおける電気炉ダストの捕集特

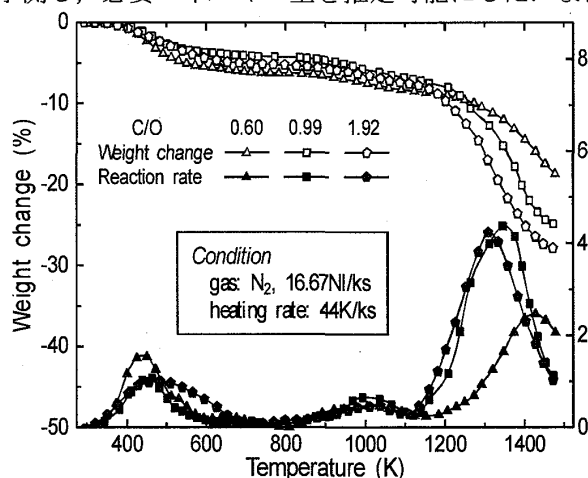


Fig. 8. Weight change and reaction rate under heating-up condition.⁹⁾

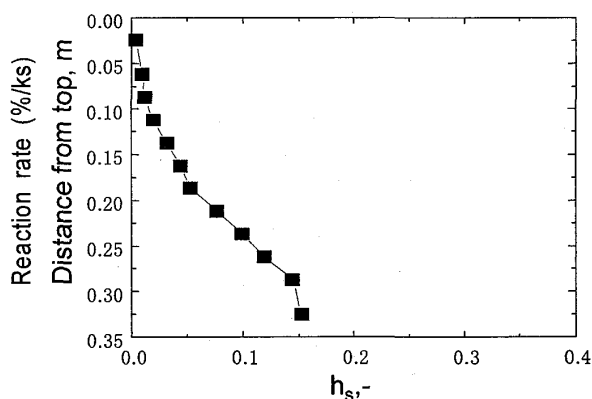


Fig. 9. Longitudinal distribution of static hold up measured in moving bed at steady state.¹⁰⁾

性を検討するため、コールドモデル実験を行い静的ホールドアップの分布を測定した結果を Fig. 9 に示した¹⁰⁾。サブミクロン粒子は非常に高い捕集率を示している。しかし、別の実験で、オーバミクロン粒子については数%程度の静的ホールドアップしか得られなかった。

4. 高炉内要素現象の研究

高炉内現象については多くの有効な研究報告があるが、多流体モデルに基づく数学的モデルにおいて、重要な役割を果たす現象のうち、気固間対流伝熱係数、充填層中での濡れない流体の滴下流れお

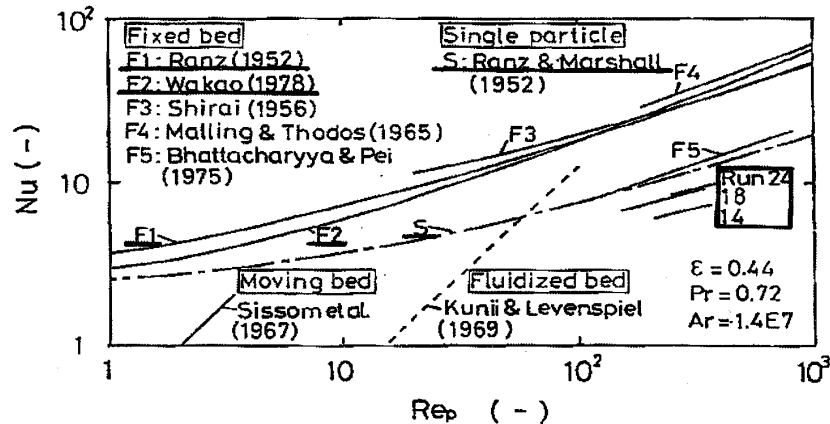


Fig. 10. Heat transfer coefficients reported previously.¹¹⁾

よび濡れ面積、充填層中での粉体の運動、炉芯コークスの更新、コークスからの粉体の発生、融着層の形成などの研究を実施してきた。気固間対流伝熱係数¹¹⁾については、Fig. 10 に示すように、充填層における気固間の熱交換を表す伝熱係数を推算するため Ranz-Marshall 式の修正式を提案した。

$$Nu = 2.0 + 0.39 (Re_p)^{1/2} (Pr)^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

充填層中の融体の流れについては、充填粒子の表面処理を施し、高炉内と同様に濡れない系におけるモデル実験を行い、Fig. 11 に示すように恩田らが示した濡れる系における測定値とはかなり異なる濡れ面積が得られている。無次元式で表すと(3)式のようになる¹²⁾。

$$a_w / a_t = 0.400 Re_m^{0.218} We_m^{0.0428} Fr_m^{-0.0238} Nc^{-0.0235} \dots \dots \dots (3)$$

濡れ面積は固液間の反応速度の評価に影響する重要な因子である。

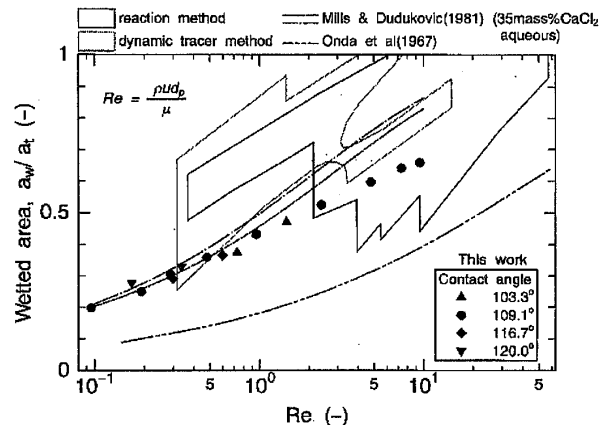


Fig. 11. Comparison of measured wetted area with previous studies.^{7) 12)}

5. エクセルギー解析

エネルギー効率をより正確に評価し有効利用を進めるため、プロセスのエクセルギー（有効エネルギー）解析を行い、製鉄プロセスにおける必要エネルギーの比較を行った。結果を Fig. 12 に示した¹³⁾。溶融還元法は大量のエネルギーを消費し、高温の熱エネルギー

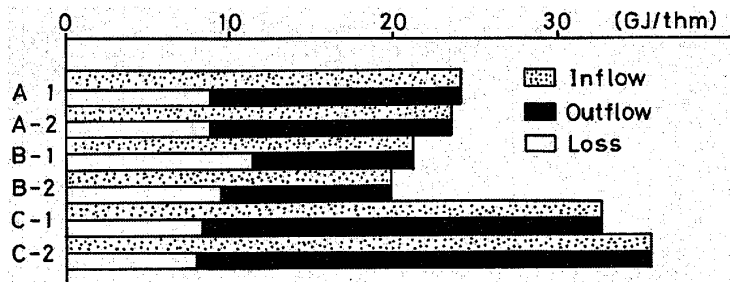


Fig. 12. Overall Exergy Loss in Different Ironmaking Systems. (System Exergy Analysis)¹³⁾

を未利用で放出するので、これを有効に利用するプロセスとの組み合わせが必要である。しかし、予備還元率と 2 次燃焼率を適当に選べば、高炉並みの効率にまで上げることができ、Fig. 13 に示すように CO₂ 放出も低下する¹⁴⁾。

6. 溶融スラグからのエネルギー回収およびメタノール、DME 合成

製鉄プロセスは多量の廃棄物と未利用エネルギーを排出している。これらを有効に利用することが、省エネルギー化や環境改善のため重要である。当研究室では 1500℃ 以上の温度で排出される溶融スラグの微粒化とエネルギー回収を同時に行うため、Fig. 14 に示すロータリーカップと充填層を組み合わせたプロセスを提案した¹⁵⁾。ロータリーカップを使った溶融スラグの微粒化実験により、Fig. 15 にしめすようにスラグの微粒子が得られた。また、スチーム・リフォーミング反応による反応熱蓄熱法によるスラグの顕熱回収の可能性を検討した。

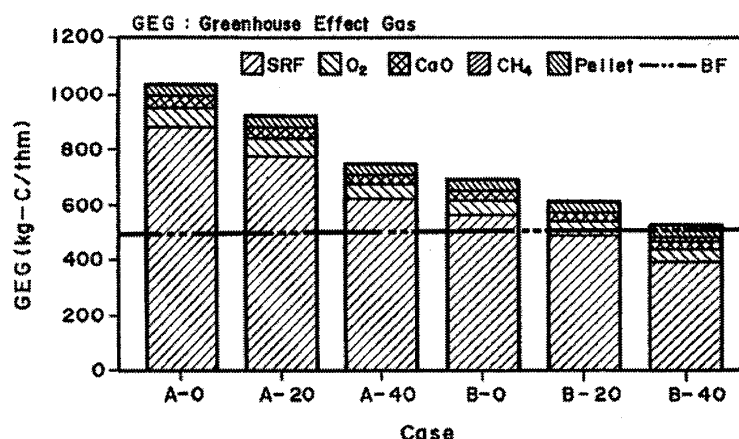


Fig. 13. Greenhouse gas emission from the smelting reduction systems.¹⁴⁾

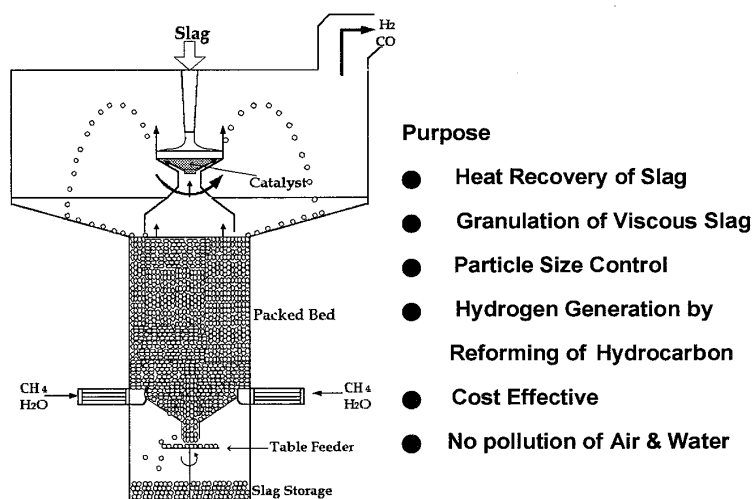


Fig. 14. An image of the proposed slag treatment process.¹⁵⁾

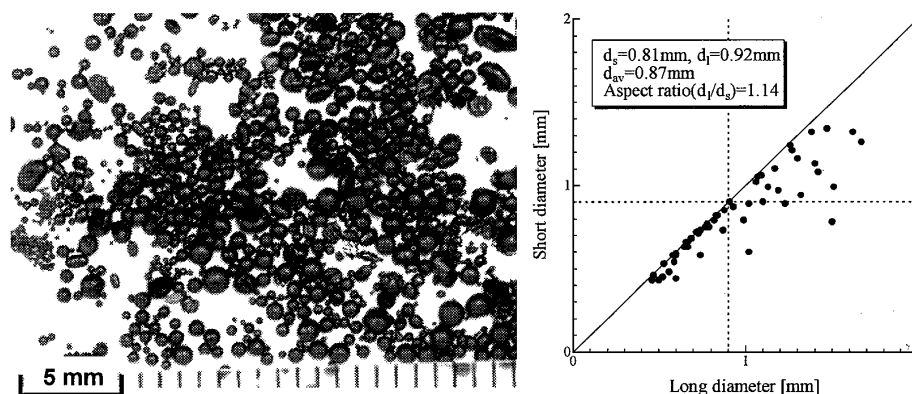


Fig. 15. Experimental Results (3000rpm).¹⁵⁾

一方、高炉からの排出ガスからメタノールを合成する実験を行い、低濃度の H₂ からメタノールを合成するために必要な触媒について検討した。この実験において有用成分である DME がメタノールから合成されていることを見出した。Fig. 16 には最大効率を示した触媒の反応成績を示した¹⁶⁾。

7. 水素吸蔵合金の燃焼合成

水素吸蔵合金は来るべき水素エネルギー社会において、重要な役割を果たす水素の貯蔵・輸送媒体として期待されている。また、反応熱蓄熱法による中高温排熱回収法に使用するための有望な素材でもある。すでに開発されている水素吸蔵合金のうち Mg_2Ni は最大吸蔵量が 3.6 mass% と大きく、将来性が期待されているが、Fig. 17 に示すように現行の製造法は再溶解や活性化プロセスなどを必要としている¹⁷⁾。当研究室では、これらのプロセスが不要になる水素化燃焼合成法の開発に取り組んだ。Mg と Ni の粉体の成型体、混合物を Fig. 18 に示した温度パターンで合成すると、圧力と保持時間の関係で Fig. 19 に示した条件下で完全な Mg_2NiH_4 が合成されることが見出されている¹⁸⁾。

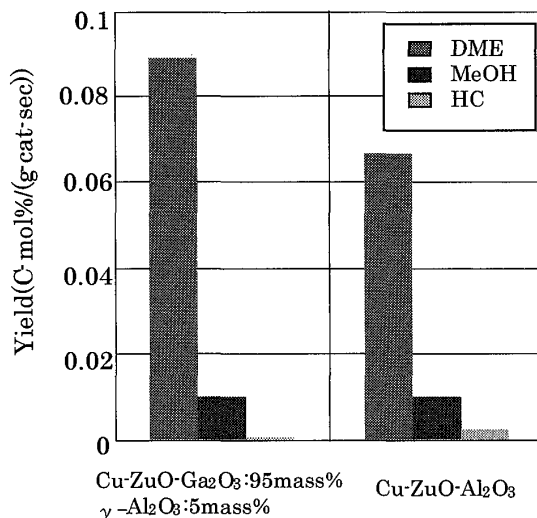


Fig. 16. Yields of dimethyl-ether, methanol and hydrocarbon over hybrid catalyst and single catalyst.¹⁶⁾

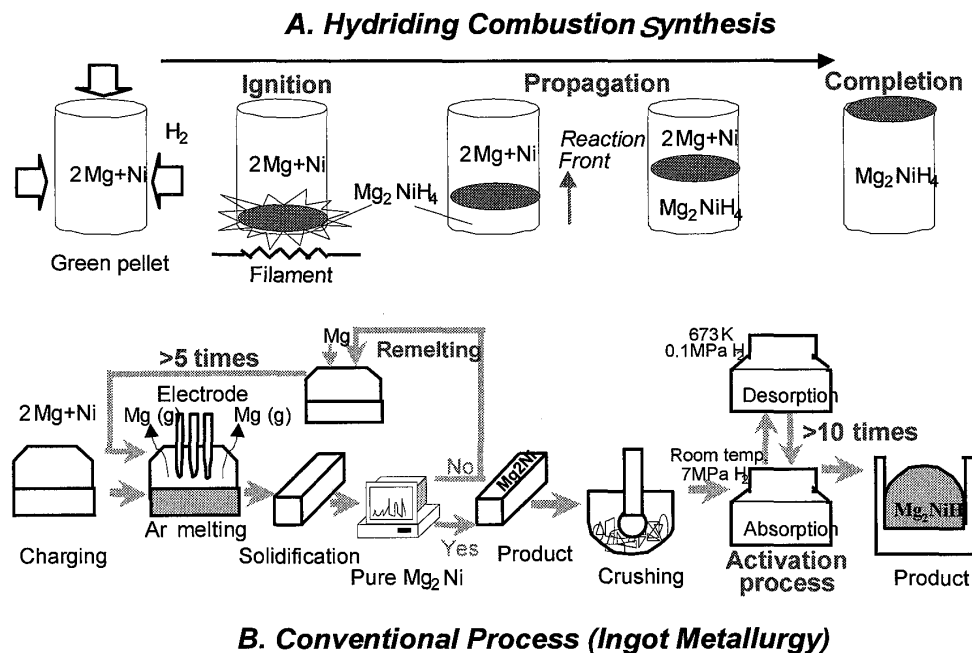


Fig. 17. Flow diagram of (A) combustion synthesis and (B) conventional process based on ingot metallurgy for the production of Mg_2NiH_4 .¹⁷⁾

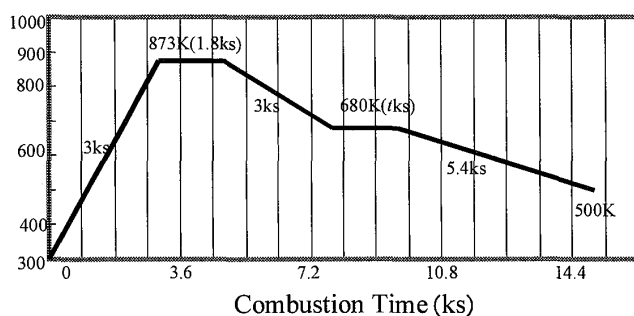


Fig. 18. Temperature profile of HCS of Mg_2NiH_4 .¹⁸⁾

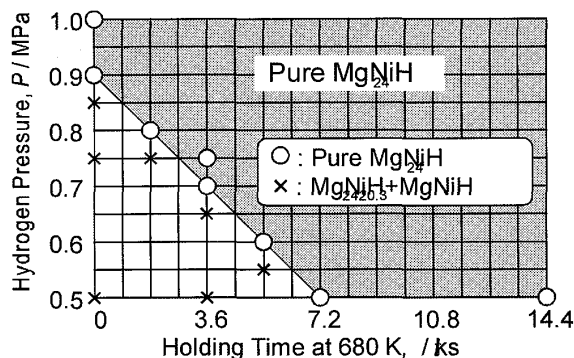


Fig. 19. Contour map of the content of Mg_2NiH_4 calculated by the semi-quantity method.¹⁸⁾

8. 共同研究者

上述した研究成果のほかにも、Ilumenite の還元、高融点金属のプラズマ溶解・精製、Laterite の製錬などについても、工学的に有用な知見が得られている。すでに Table 1 にそれぞれの研究者が取り組んだテーマをまとめて示し、Fig. 2 にはそれらの相互関係を示したが、Table 2 には、当研究室において 1983～2005 年の約 22 年間にスタッフ、滞在研究者、ポストドクター研究者、博士課程および修士課程の学生、留学生特別コースの外国人研究生、JICA の研修生などとして、研究に従事した研究者や学生の数を示した。このほかにも特定のプロジェクトにおいて共同研究者として参加した他機関の研究者も加えて、多くの方々の努力により得られた研究結果である。

Table 2. 関連研究者数の概要

1. 博士学位取得者: 25名
① 論文博士(9名), コース博士(16名)[注: 社会人博士 5名]
② 日本人(12名), 外国人(13名)[注: 留学生特別コース 6名]
③ 研究室内研究(17名), 研究室外研究(8名)
2. ポストドクター 5名(外国人 4名, 日本人 1名)
3. 滞在研究者 7名
4. JICA 研究生 8名
5. 修士課程修了生 36名(日本人 32名, 外国人 4名)
6. 職員 10名

9. まとめ

昭和 44 年以来、東北大学に勤務した 36 年間のうち、21 年 8 ヶ月にわたり、選鉱製錬研究所冶金化学工学研究部門(8 年 8 ヶ月)、素材工学研究所システム評価研究分野(9 年)、多元物質科学研究所物理プロセス制御研究分野(4 年)を担当した。研究所の改組を 2 度経験し、そのたびに工学の研究のあり方、研究対象などについて考えさせられた。しかし、研究室での研究の基本方針は以下の通りで、変わることはなかった。

反応プロセスの数学的モデルの研究には、コンピューターコードの開発およびプロセスシミュレーションという理論的側面と要素現象の速度論的研究という実験的側面があり、両者をバランスよく研究することにより優れた成果が得られる。数学的モデルは数式で表現される枠組みと要素現象の速度式の組み合わせで構成されており、シミュレーションの結果はこれらの効果を重ね合わせたものである。したがって、モデルの内容を十分理解している研究者のみが、結果を正しく解釈することが出来る。内容を理解しないまま、シミュレーションと称する計算にのみ走ることは、決してよい結果をもたらすものではないという基本姿勢に基づき研究室を運営した。幸いにして、よき恩師、先輩、多くの優秀なスタッフ、滞在研究者、学生にめぐまれ、また、技官、事務官、その他多くの方々のご支援、ご鞭撻により、楽しい研究生を送り、今日を迎えられましたことに感謝申し上げます。

文献

- (1) J. Yagi: Int'l. Workshop on Compact Blast Furnace, Tokyo (2003), 251-257.
- (2) P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **37**(1997), 458-467
- (3) P. R. Austin, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **37**(1997), 748-755
- (4) J. A. Castro, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **40**(2000), 637-646
- (5) J. A. Castro, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **42**(2002), 44-52
- (6) M. Chu, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **44**(2004), 510-517
- (7) M. Chu, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **44**(2004), 801-808
- (8) M. Chu, H. Nogami and J. Yagi: ISIJ International, **44**(2004), 2159-2167
- (9) 張興和, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **81**(1995), 1043-1048
- (10) J. Yagi, S. Okabe, M. Ribas, H. Nogami and R. Takahashi, Proc. 5th Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy-Environments in Metallurgical Industries, (2004), 517-530
- (11) 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **76**(1990), 848-855
- (12) 牛明愷, 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **82**(1996), 647-652
- (13) 秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, **74**(1988), 2270-2277

- (14) 秋山友宏, 八木順一郎 : 鉄と鋼, **77**(1991), 1259-1266
- (15) T. Mizuochi, T. Akiyama, T. Shimada, E. Kasai and J. Yagi : ISIJ International, **41**(2001), 1423-1428
- (16) T. Akiyama, S. Machida, H. Sato, A. Muramatsu and J. Yagi : ISIJ International, **38**(1998), 93-97
- (17) 磯貝宏道, 秋山友宏, 八木順一郎: 日本金属学会誌, **60**(1996), 338-344
- (18) T. Akiyama, T. Negishi, K. Saito, L. Li and J. Yagi: Mat. Trans., **42**(2001), 1748-1752